

# Étude expérimentale des flux de quantité de mouvement et de chaleur dans une couche de mélange anisotherme

Kodjovi Sodjavi<sup>a,b</sup> et Johan Carlier<sup>a,b</sup>

a. Irstea, UR TERE, F-35044 Rennes, France

b. Université Européenne de Bretagne, Rennes, France

## Résumé :

*L'étude porte sur une couche de mélange plane horizontale générée par la rencontre de deux écoulements parallèles à vitesse et température différentes. La thermo-anémométrie à température de fil variable, étendue à l'utilisation de sonde fils croisés, a permis la mesure instantanée des fluctuations de vitesse (composantes longitudinale et transversale) et de température dans l'écoulement. Les densités de probabilité jointes ont pu ainsi être obtenues, et leur analyse a mis en évidence les mécanismes et événements qui contribuent significativement aux flux transversaux de quantité de mouvement et de chaleur. Ces différentes contributions ont été différenciées et quantifiées par une analyse en quadrant qui a fait ressortir la prépondérance des mouvements d'entraînement et d'éjection, et leur dissymétrie.*

## Abstract :

*The turbulent mixing was studied in a thermal plane turbulent mixing layer induced by two parallel incident streams with velocity and temperature differences. Variable temperature hot wire anemometry extended to use  $\times$ -wire probe allowed instantaneous measurements of velocity (longitudinal and transverse components) and temperature fluctuations in the flow. Joint probability density function could be assessed and the mechanisms and events that significantly contribute to the transverse momentum and heat fluxes were highlighted. These contributions were differentiated and quantified through a quadrant analysis which emphasized the dominance of the local movements of entrainment and ejection, and their dissymmetry.*

## 1 Introduction

Les écoulements d'air dans les dispositifs industriels pour lesquels se pose la nécessité de séparer deux ambiances climatiques, sans barrière solide, sont sous bien des aspects analogues à l'écoulement de couche de mélange anisotherme, notamment lorsque les profils moyens de vitesse et de température sont à contre-gradient (le flux haute vitesse est froid et le flux basse vitesse est chaud). La présente étude porte spécifiquement sur les flux transversaux de quantité de mouvement et de chaleur directement responsable du mélange entre les deux ambiances. Si la couche de mélange est un écoulement académique relativement bien documenté sur le plan cinématique [1, 2, 3, 4] et sur le plan du scalaire transporté [5, 6, 7, 8], le couplage vitesse-température responsable des flux transversaux de chaleur reste encore assez mal compris. Ainsi, les densités de probabilité (PDFs) des différentes quantités ont un comportement relativement bien connu, comme le type « marching » ou « non-marching » de l'évolution des PDFs de température à travers la couche de mélange, mais les densités de probabilité jointes (JPDFs) de vitesse et de température ont encore été peu étudiées [9]. La raison principale réside dans la difficulté de mesurer la vitesse et la température de façon simultanée, dans un petit volume de mesure et à haute fréquence. À ce jour, la thermo-anémométrie à température de fil variable apparaît comme une méthode de mesure opérationnelle qui répond très bien à ces exigences, eu égard aux échelles de la turbulence dans l'écoulement étudié. Elle a été développée récemment par Ndoye [10] pour la mesure simultanée de la température et de la composante longitudinale de la vitesse avec une sonde fil simple. Elle a ensuite été étendue par Sodjavi [11] à l'utilisation de sonde fils croisés pour la mesure supplémentaire de la composante transversale de la vitesse. Cette amélioration est de première importance puisqu'elle permet d'accéder au transport par la turbulence dans la direction transversale à l'écoulement principal, soit au transport de chaleur à travers la couche de mélange. Cette méthode est utilisée ici pour accéder aux JPDFs de vitesse et de température, ce qui permet d'étudier les mécanismes et événements qui contribuent significativement aux flux transversaux de quantité de mouvement et de chaleur.

## 2 Description de l'expérience

Sont décrits succinctement dans cette section la soufflerie dédiée à l'étude de la couche de mélange, la thermo-anémométrie à température de fil variable et la configuration de l'écoulement étudié. Le lecteur intéressé pourra trouver une description plus détaillée dans les thèses de Ndoye [10] et de Sodjavi [11].

### 2.1 Soufflerie de couche de mélange

L'écoulement est réalisé à l'aide de deux circuits aérauliques juxtaposés fonctionnant en circuit ouvert. Les deux flux d'air, aspirés séparément au niveau de deux ouïes, passent par un caisson de mise en pression, suivi d'une chambre de tranquillisation, puis pénètrent dans un convergent de rapport de contraction de 2.5. Les deux circuits sont séparés par une plaque dont le bord de fuite en aluminium est effilé avec une pente de 3° et une épaisseur terminale de 3 mm. Les deux flux parallèles co-courants débouchent de part et d'autre de la plaque séparatrice dans une veine d'essai de  $1 \times 1 \text{ m}^2$  de section carrée et de 3 m de longueur. Le refoulement se fait *via* un divergent situé en aval. La vitesse et la température de ces deux courants sont régulées respectivement entre 0.5 et 5 m/s et entre 5 et 35 °C. L'ensemble du dispositif permet de générer un écoulement homogène, sans gradient longitudinal de vitesse et de température et avec un taux de turbulence faible, d'environ 1%. La turbulence dans les couches limites de part et d'autre de la plaque séparatrice est déclenchée loin en amont. L'épaisseur de déficit de quantité de mouvement des couches limites est d'environ 2 mm avec un facteur de forme de 1.4, comme attendu pour un régime turbulent.

### 2.2 Thermo-anémométrie à température de fil variable

La thermo-anémométrie à surchauffe multiple a été initialement proposée par Corrsin [12]. En partant du principe qu'un fil chaud est sensible à la vitesse pour les surchauffes de fil élevées et à la température pour les surchauffes de fil faibles, l'utilisation de fils chauds soumis à des surchauffes différentes permet de découpler les effets de la vitesse et de la température. Les différentes surchauffes peuvent être appliquées soit simultanément à différents fils séparés dans l'espace, soit séquentiellement à un ou plusieurs fils. La seconde méthode présente l'avantage de minimiser le nombre de fils, et donc le volume de mesure, et d'éviter les problèmes d'interférences entre les fils, au détriment d'une mesure strictement instantanée. Pour le mettre en œuvre, Joël Delville, de l'institut Pprime, a mis au point un anémomètre à température de fil variable (voir Ndoye *et al.* [9]). Les surchauffes sont appliquées de manière cyclique au fil, et sur des temps assez courts, de sorte que le fil passe rapidement d'un régime à température de fil constante à un autre. La vitesse et la température instantanées de l'écoulement, supposées constantes pendant la durée d'un cycle, sont déduites de la résolution d'un système préalablement étalonné d'équations polynomiales, les reliant aux tensions représentatives des différentes surchauffes. Dans cette étude, une sonde de fils croisés de  $2.5 \mu\text{m}$  de diamètre et de 0.8 mm de longueur associée à des cycles de deux surchauffes a permis d'atteindre une fréquence d'acquisition de 1 kHz.

### 2.3 Configuration étudiée

Une configuration de couche de mélange anisotherme se définit par la différence de vitesse entre les deux flux parallèles  $\Delta U = U_h - U_l$  (ou le rapport de vitesse modifié  $\lambda = \frac{\Delta U}{U_h + U_l}$ ), la vitesse de convection  $U_c = \frac{(U_l + U_h)}{2}$  et la différence de température  $\Delta \Theta = \Theta_h - \Theta_l$ . Les indices  $h$  et  $l$  désignent les grandeurs (vitesse et température) associées aux deux flux uniformes incidents,  $h$  pour le flux de haute vitesse ( $U_h$ ) ou haute température ( $T_h$ ) et  $l$  pour le flux de basse vitesse ( $U_l$ ) ou basse température ( $T_l$ ). En plus de ces paramètres, il est nécessaire de préciser si les profils moyens de vitesse et de température sont à contre-gradient ou co-gradient, et si la stratification de la température (la couche de mélange est horizontale) est en configuration stable ou instable à l'égard des forces de flottabilité. Dans cette étude, l'analyse des résultats s'appuie sur une configuration unique de couche de mélange anisotherme, à contre-gradient, et de stratification stable avec  $\lambda = 0.33$ ,  $U_c = 3 \text{ m/s}$  et  $\Delta \Theta = 20 \text{ K}$ . La grille de points de mesure est constituée de 911 points répartis en 11 profils transversaux. Une fréquence d'acquisition de 1 kHz et un temps d'acquisition de 60 s ont permis d'assurer la convergence des moments d'ordre 2 et 3 en chaque point de la grille.

## 3 Résultats et discussion

Il est bien connu que le mélange turbulent évolue de façon auto-similaire [3], avec des profils de quantités statistiques en affinité géométrique et, dans le cas de la couche de mélange, une épaisseur de mélange linéairement croissante à la fois pour la vitesse et la température. Pour la configuration explorée, la région de similitude commence à environ 1 000 mm en aval du bord de fuite, soit 800 fois l'épaisseur de déficit de

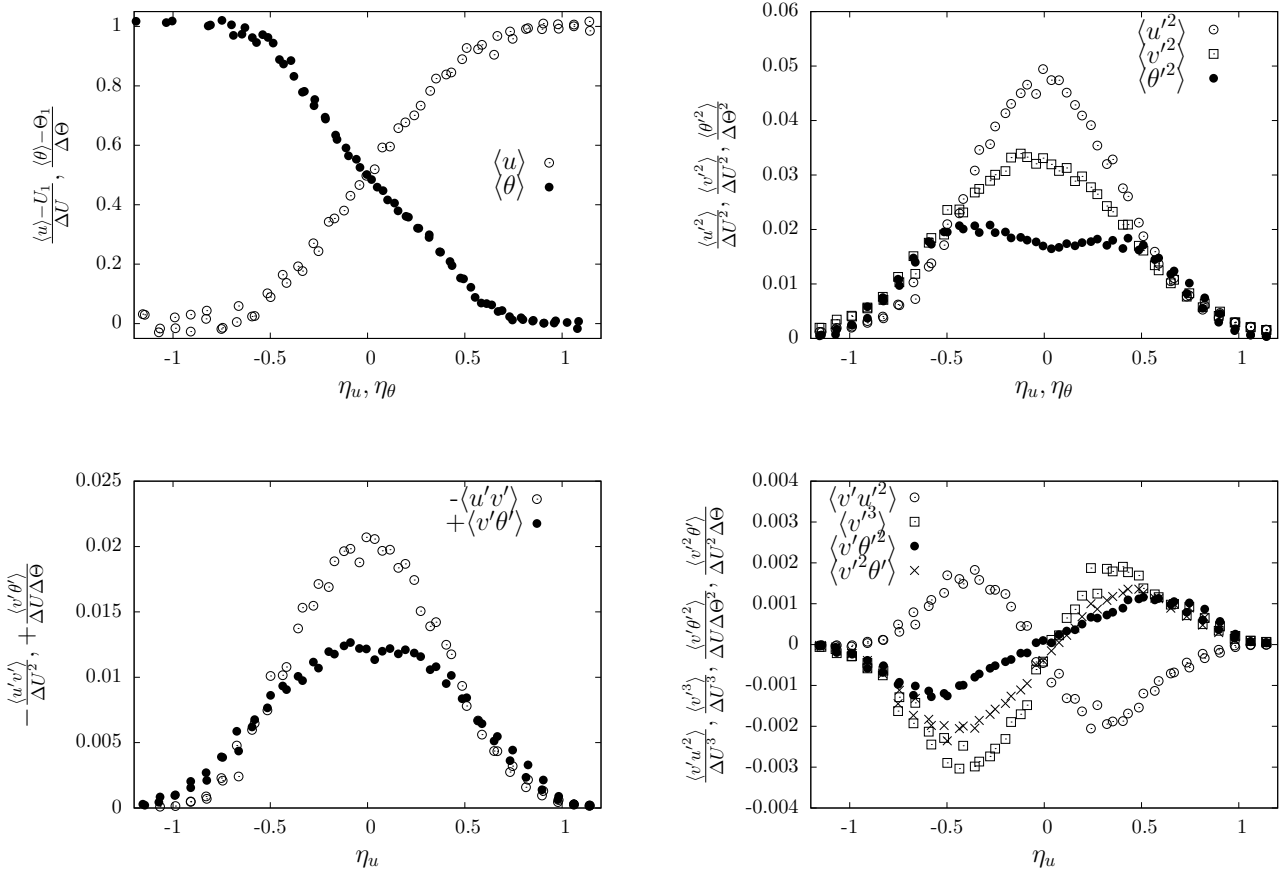


FIGURE 1 – Profils transversaux dans la région de similitude.

quantité de mouvement de la couche limite turbulente côté haute vitesse. Le taux d'expansion dynamique et thermique sont respectivement de 0.055 et 0.074, et le rapport des deux donne 0.74, proche du 0.72 obtenu par Batt [7]. Le nombre de Richardson de flux est de  $Ri_f = 0.03$ , ce qui correspond à un écoulement sans effet de flottabilité (cf. thèse de Sodjavi [11]). Dans cette section, les résultats sont donnés dans la région de similitude et sont donc représentés en variables de similitude avec  $\eta_{u,\theta} = \frac{y-y_0}{\delta_{u,\theta}}$ , où  $\delta_{u,\theta}$  est l'épaisseur dynamique ou thermique de la couche de mélange, et  $y_0$  est l'axe de la couche de mélange.

### 3.1 Profils transversaux

La figure 1 présente les profils transversaux de quelques quantités statistiques. Il s'agit là des profils à contre-gradient de vitesse et de température moyennes, des variances de fluctuations de vitesse et de température, des flux de quantité de mouvement et de chaleur, et de corrélations triples qui participent à la diffusion turbulente. Le profil de vitesse longitudinale moyenne est symétrique avec un point d'inflexion unique situé sur l'axe de la couche de mélange, à la différence du profil de température moyenne qui présente trois points d'inflexion. C'est un comportement classique, souligné à de nombreuses reprises [5, 8, 9]. Sur les variances de vitesse et de température, les extrema sont situés au niveau des points d'inflexion qui correspondent à des gradients élevés sur les profils moyens. La valeur et la position de ces extrema sont conformes aux résultats obtenus dans de précédents travaux [2, 13, 7, 14]. Le pic de  $\langle u'u' \rangle$  est centré et correspond au maximum de la production d'énergie cinétique turbulente ( $\langle u'v' \rangle \frac{\partial \langle u \rangle}{\partial y}$ ). Le pic de  $\langle v'v' \rangle$  est légèrement décalé vers le côté du flux basse vitesse. Le double pic de  $\langle \theta'\theta' \rangle$  sur les deux côtés de l'axe n'est pas symétrique, le plus grand pic étant situé du côté du flux basse vitesse. Ce double pic est associé aux deux plus grand extrema du gradient moyen de température et correspond à une production maximale des fluctuations de température ( $\langle v'\theta' \rangle \frac{\partial \langle \theta \rangle}{\partial y}$ ). À noter que le flux de scalaire  $\langle v'\theta' \rangle$  est une quantité rarement mesurée. Le profil obtenu dans ce présent travail est en accord avec celui de Batt [7] dans le cas d'une température et Koochesfahani *et al.* [14] dans le cas d'une concentration d'espèce.

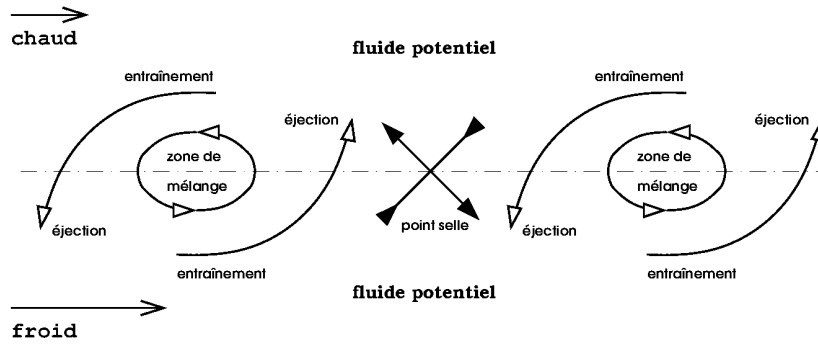


FIGURE 2 – Schéma simplifié de la structure de l'écoulement illustrant les principaux mouvements contribuant aux flux de quantité de mouvement et de chaleur.

### 3.2 Densités de probabilité jointes

L'analyse des JPDFs est intrinsèquement liée à l'énoncé d'*a priori* sur la topologie de l'écoulement considéré. En plus des structures tourbillonnaires couramment utilisées dans la littérature, nous introduisons deux événements cohérents supplémentaires : le mouvement d'entraînement et le mouvement d'éjection. Comme illustré sur la figure 2, le mouvement d'entraînement est constitué de fluide arraché au flux uniforme par une structure tourbillonnaire. Une éjection est constituée du fluide entraîné et qui, après diffusion et autres processus, est transporté de l'autre côté de l'axe de la couche de mélange. Nous utilisons également la notion de zone de mélange, en l'associant au cœur des structures tourbillonnaires, la notion d'écoulement potentiel ( $\nabla \cdot u = 0$  et  $\nabla \times u = 0$ ), pour désigner les deux flux uniformes, et la notion de front, relative au fort cisaillement à l'interface des deux écoulements potentiels, un front de cisaillement étant situé entre deux structures tourbillonnaires et aligné sur l'axe divergent du point selle. Les éjections et les entraînements ne sont donc pas les seuls mouvements qui contribuent au flux de quantité de mouvement et de chaleur. Le cœur des structures tourbillonnaires et les fronts sont le siège d'interactions turbulentes qui participent également à ces flux.

La figure 3 présente l'évolution transversale des JPDFs  $P_{u'v'}$  et  $P_{v'\theta'}$ . Ces JPDFs sont divisées en quatre quadrants repérés par leur numéro :  $\frac{u}{u} | \frac{v}{v}$ . À proximité de la frontière moyenne du champ dynamique ( $\eta_u \simeq \pm 1$ ), les JPDFs  $P_{u'v'}$  présentent une forme *quasi* circulaire centrée sur l'origine de  $(u', v')$  alors que les JPDFs  $P_{v'\theta'}$  ont une forme elliptique de grand axe aligné avec  $\theta'$ . Ceci s'explique par un flux transversal de chaleur présentant une expansion plus large que pour la quantité de mouvement. La forme *quasi* circulaire de  $P_{u'v'}$  correspond à l'écoulement libre où les PDFs de  $u'$  et  $v'$  sont gaussiennes et la forme elliptique de  $P_{v'\theta'}$  correspond à une mesure à l'intérieur de la couche thermique où les PDFs de  $\theta'$  sont non gaussiennes avec un facteur d'aplatissement élevé. Au cœur de la couche de mélange ( $-0.25 \leq \eta_u \leq +0.25$ ), les JPDFs  $P_{u'v'}$  présentent une forme elliptique de grand axe orienté suivant les quadrants I et III. Cette orientation privilégiée et le signe du gradient de vitesse moyenne sont en accord avec un terme de production positif. Ces quadrants sont représentatifs des éjections et des entraînements. De part et d'autre de l'axe de la couche de mélange, la forme elliptique, légèrement plus étirée dans un des deux quadrants, correspond toujours à des éjections plus rares mais plus intenses que les entraînements. Sur l'axe de la couche, les événements s'équilibrent approximativement. Cette analyse du comportement des JPDFs  $P_{u'v'}$  à l'intérieur de la couche de mélange peut être formulée à l'identique pour les JPDFs  $P_{v'\theta'}$ . On notera simplement que les JPDFs  $P_{v'\theta'}$  présente un aspect bimodal qui brise leur forme elliptique. Le mode central correspond aux zones de mélange et le mode périphérique se situe dans le quadrant relatif aux entraînements de fluide. Les éjections, qui apparaissent dans le quadrant opposé, semblent encore une fois plus rares et plus intenses. L'écoulement se présente alors dans cette région comme la succession d'un mouvement d'entraînement long et peu intense, puis d'un mouvement d'éjection court et intense suivi d'une bouffée turbulente correspondant au passage d'une structure tourbillonnaire. Les mouvements d'entraînement et d'éjection sont des mouvements opposés de température différente, séparés par un front bien marqué, soit une situation fortement génératrice de variance et d'intermittence pour les fluctuations de température. Par ailleurs, en considérant la température comme un marqueur de l'origine d'une particule fluide, les JPDFs  $P_{v'\theta'}$  semblent globalement indiquer que le fluide mélangé est plus froid que la moyenne locale, ce qui se caractérise par la prépondérance des événements liés à  $\theta' < 0$ . Cela confirme les résultats de la littérature [15, 16] sur un déséquilibre du taux d'entraînement en faveur du côté haute vitesse, ici à basse température.

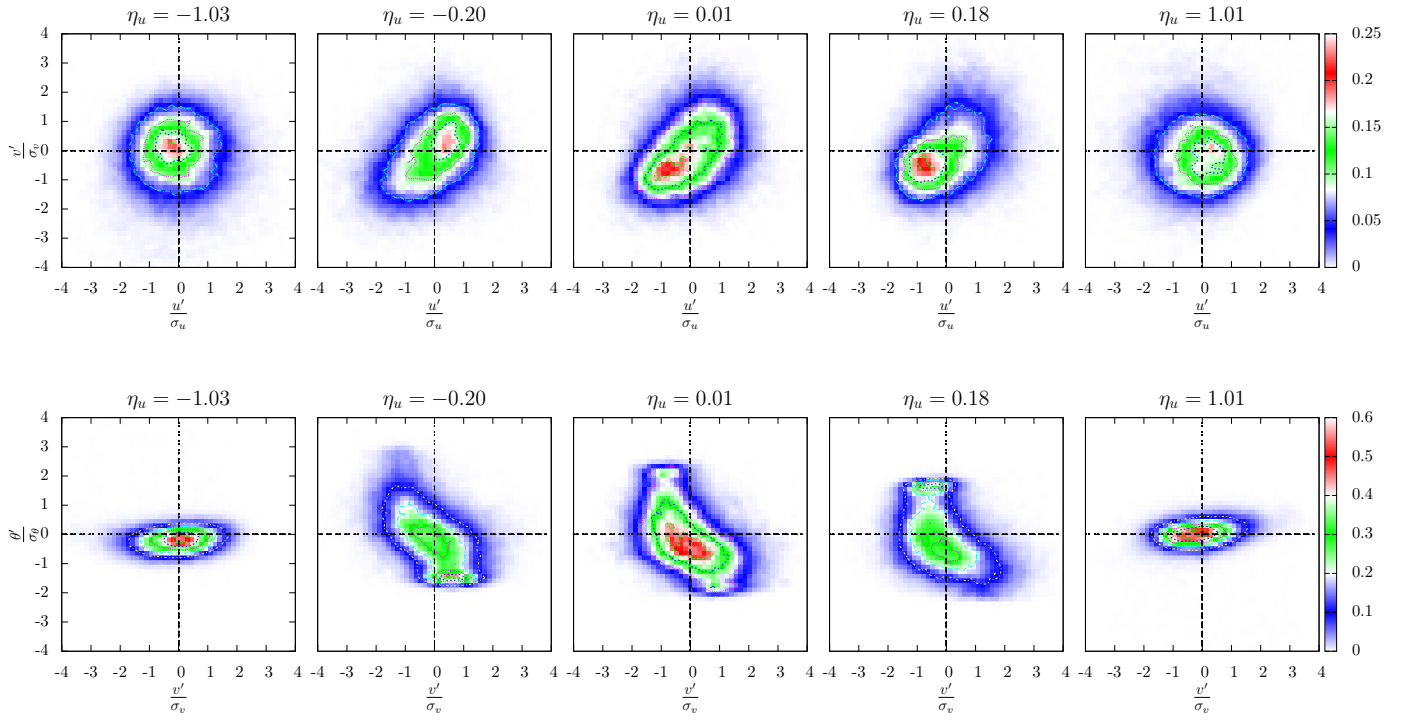


FIGURE 3 – JPDFs associées aux paires de distributions  $(u', v')$  et  $(v', \theta')$  : en haut,  $P_{u'v'}$  ; en bas,  $P_{v'\theta'}$ .

### 3.3 Analyse en quadrant

L'analyse des JPDFs a permis d'identifier les mécanismes ou évènements qui contribuent significativement à la production du flux transversal de quantité de mouvement et de chaleur. La contribution relative de ces différents évènements aux corrélations  $\langle u'v' \rangle$  et  $\langle v'\theta' \rangle$  est présentée, par analyse en quadrant, sur la figure 4. Dans l'ensemble, on observe deux contributions faibles correspondant aux zones de mélange et deux contributions fortes correspondant aux deux quadrants relatifs aux mouvements d'entraînement et d'éjection de fluide provenant d'un côté ou de l'autre de l'axe de la couche dynamique. Ces deux contributions dominantes se présentent en forme de cloche légèrement déportée toujours du côté éjection, signifiant la prépondérance, en intensité, des éjections sur les entraînements. La contribution des mouvements d'entraînement est identique de part et d'autre de l'axe de la couche de mélange, à la fois pour la corrélation  $\langle u'v' \rangle$  et  $\langle v'\theta' \rangle$ . La contribution des mouvements d'éjections est également identique de part et d'autre de l'axe de la couche de mélange pour la corrélation  $\langle u'v' \rangle$ . Elle est légèrement plus élevée du côté basse vitesse par rapport à la même contribution côté haute vitesse pour la corrélation  $\langle v'\theta' \rangle$ , pouvant en partie expliquer les dissymétries observées sur les profils transversaux des quantités statistiques, notamment pour la température. Les tendances révélées par l'observation des JPDFs, présentées uniquement en quelques points de la grille de mesure, sont ainsi confirmées en restituant l'information sous forme de moyenne conditionnelle (analyse en quadrant) pour un profil transversal complet.

## 4 Conclusions

Les mesures instantanées des fluctuations de vitesse et de température ont été obtenues par une méthode récente de thermo-anémométrie à température de fil variable, étendue ici à l'utilisation de sonde fils croisés. Ces nouvelles mesures ont été utilisées pour établir les JPDFs de vitesse et de température. L'analyse des JPDFs a conforté et précisé l'organisation proposée de l'écoulement. Il est intéressant de noter que la mesure simultanée de la vitesse et de la température offre la possibilité de définir une structure cohérente autrement que sur une base entièrement cinématique. En considérant la température comme un marqueur de l'origine des flux, l'organisation spatiale de l'écoulement s'en trouve mieux perçue. Ainsi, les mécanismes et évènements qui contribuent significativement aux flux transversaux de quantité de mouvement et de chaleur ont été mis en évidence. Ces différentes contributions ont pu être différenciées et quantifiées par une analyse en quadrant qui a fait ressortir la prépondérance des mouvements d'entraînement et d'éjection, avec une légère dissymétrie en intensité de part et d'autre de l'axe de la couche de mélange. La dissymétrie des mouvements d'éjection, et la raideur des fronts, expliquent la forme des profils transversaux des quantités statistiques, notamment pour la température.

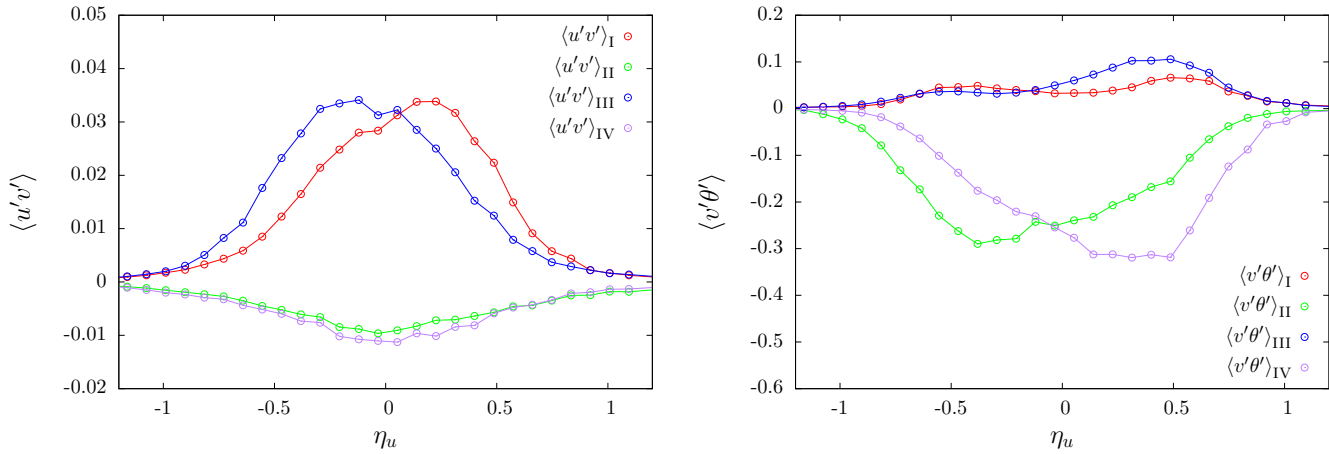


FIGURE 4 – Analyse en quadrant.

**Remerciements :** Les auteurs de cette étude tiennent à remercier la Région Bretagne et Irstea pour leur soutien financier et tous les membres de l'équipe ACTA pour leurs précieux conseils et appuis techniques.

## Références

- [1] P. Bradshaw. The effect of initial conditions on developpement of free shear layer. *J. Fluid Mech.*, 27 :225–236, 1966.
- [2] I. Wygnanski and H. E. Fiedler. the two-dimensionnal mixing region. *J. Fluid Mech.*, 41 :327–361, 1970.
- [3] A. A. Townsend. *Structure of turbulent shear flow*. Cambridge University Press, 1976.
- [4] R. D. Metha and R. V. Westphal. Near-field turbulence properties of single-and two-stream plane mixing layers. *Experiments in Fluids*, 4 :257–266, 1986.
- [5] H. E. Fiedler. Transport of heat across a plane turbulent mixing layer. *Advances in Geophysics*, 18 :93–109, 1974.
- [6] G. L. Brown and A. Roshko. On density effects and large structure in tuburlent mixing layers. *J. Fluid Mech.*, 64 :775–816, 1974.
- [7] R. G. Batt. Turbulent mixing of passive and chemically reacting species in a low speed shear layer. *J. Fluid Mech.*, 22 :93–126, 1977.
- [8] S. M. Masutani and C. T. Bowman. The structure of chemically reacting plane mixing layer. *J. Fluid Mech.*, 172 :93–126, 1986.
- [9] M. Ndoeye, J. Delville, D. Heitz, and G. Arroyo. Parameterizable constant temperature anemometer : a new method for the analysis of velocity-temperature coupling in turbulent heat transfer. *Meas. Sci. Technol.*, 21(7) :075401, 2010.
- [10] M. Ndoeye. *Anémométrie fil chaud à température variable : application à l'étude d'une couche de mélange anisotherme*. Thèse de Ph.D., Université de Poitiers, 2008.
- [11] K. Sodjavi. *Étude expérimentale de la turbulence dans une couche de mélange anisotherme*. Thèse de Ph.D., Université de Rennes 1, 2013.
- [12] S. Corrsin. Extended applications of hot-wire anemometer. *Rev. Sci. Instrum.*, 18(7) :469–471, 1947.
- [13] B. W. Spencer and B. G. Jones. Statistical investigation of pressure and velocity fields in the turbulent two-stream mixing layer. In *AIAA 4th Fluid and Plasma Dynamical Conference*, pages 71–613. AIAA J., 1971.
- [14] M. M. Koochesfahani, R. K Cohn, and C. G Mackinnon. Simultaneous whole-field measurements of velocity and concentration fields using a combination of MTV and LIF. *Meas. Sci. Technol.*, 11(9) :1289–1300, 2000.
- [15] M. M. Koochesfahani and P. E. Dimotakis. Mixing and chemical reactions in a turbulent liquid mixing layer. *J. Fluid Mech.*, 170 :83–112, 1986.
- [16] L. M. Pickett and J. B. Ghandhi. Passive scalar measurements in a planar mixing layer by plif of acetone. *Experiments in Fluids*, 31 :309–318, 2001.